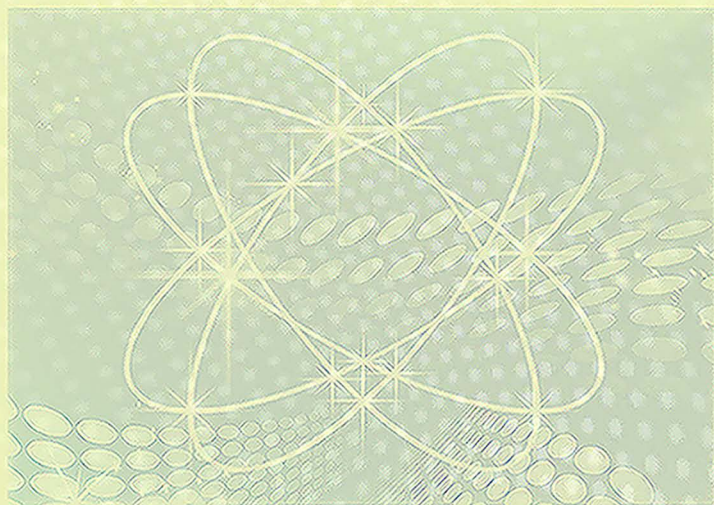


军用车辆悬挂设计

主编 董明明 边楠



北京理工大学出版社

军用车辆悬挂设计

主 编 董明明 边 楠
主 审 闫清东

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

《军用车辆悬挂设计》系统地介绍了军用车辆悬挂设计理论与计算方法,包括悬挂总体及各主要部件设计所需要的基本知识。其内容有悬挂系统性能指标及总体设计,悬挂系统的建模分析,弹性元件和阻尼元件各部件设计要求、结构方案分类与分析及其主要参数和零部件最新设计方法。本书还介绍了近年来在军用车辆悬挂中得到应用的最新技术成果。本书可作为高等院校军用车辆工程专业教材,也可作为军用车辆悬挂行业工程技术人员的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

军用车辆悬挂设计 / 董明明, 边楠主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2013. 9

ISBN 978 - - - -

I. ①军… II. ①董… ②边… III. ①汽车 - 电气设备 - 车辆修理 - 高等学校 - 教材 IV. ①U472. 41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 083726 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京国马印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 10.5

字 数 / 233 千字

版 次 / 2013 年 5 月第 3 版 2012 年 5 月第 1 次印刷

定 价 / 0.00 元

责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 多海鹏

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 吴皓云

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

前言

QIAN YAN

军用车辆悬挂的性能对行进间武器射击精度、乘员的舒适性、持续工作效能以及仪器设备的可靠性都有重要影响，悬挂的设计在整车设计中日益受到重视。世界各国装备的先进军用车辆悬挂系统采用了很多新结构、新工艺、新技术。随着对悬挂性能要求的提高，传统的基于经验的类比设计方法已经不能满足要求。我国高校和研究所多年来在军用车辆悬挂技术领域取得了许多科研成果，并已得到了应用。为了适应形势发展的需要，满足军用车辆悬挂技术人员技术更新和专业人才培养的要求，编者结合军用车辆设计和研制的特点，编写了这本《军用车辆悬挂设计》。在编写过程中，试图阐明悬挂这一复杂力学系统的本质，归纳近年来我国军用车辆悬挂领域取得的研究成果，应用现代设计方法和分析计算平台，完成悬挂及其部件的设计、分析和仿真。

本书作者常年从事军用车辆悬挂的研究工作，在工作过程以及与国内研究所和工厂科研人员的协同工作中，得到了广大一线科研人员的悉心帮助，积累了一些经验，对于实际科研生产中的需求有所了解。

本书共八章，系统论述了军用车辆悬挂系统的总体性能和设计方法、悬挂系统理论建模和仿真建模，并详细介绍了典型弹性元件与阻尼元件的设计。

本书在编写过程中得到了北京理工大学振动与噪声控制研究所老师和研究生的大力支持与协助，在此表示衷心感谢。本书部分叙述仅代表作者在悬挂领域个人的学术见解，不当或不全面之处望读者提出批评和建议。

目录

MU LU

► 第1章 概述	(1)
1.1 功用	(1)
1.2 分类	(1)
1.3 军用悬挂系统须满足的要求	(2)
1.4 悬挂系统的发展	(3)
► 第2章 悬挂系统的性能指标	(10)
2.1 悬挂系统对军用车辆火力性能的影响	(10)
2.2 悬挂系统对军用车辆机动性能的影响	(12)
► 第3章 悬挂系统的总体设计	(23)
3.1 轮式车辆悬挂的总体设计	(23)
3.2 履带车辆悬挂的总体设计	(27)
3.3 多轴轮式车辆与履带式车辆共同的问题	(30)
► 第4章 悬挂系统的建模分析	(38)
4.1 路面不平度输入	(38)
4.2 悬挂系统模型的建立	(46)
4.3 悬挂导向机构的建模分析	(59)
► 第5章 弹性元件	(78)
5.1 扭杆弹簧	(78)
5.2 油气弹簧	(92)

► 第6章 阻尼元件	(120)
6.1 减振器的分类	(120)
6.2 军用车辆减振器的基本要求	(121)
6.3 减振器的设计	(122)
6.4 减振器试验方法	(130)
6.5 液压减振器的示功图	(132)
► 第7章 限制器	(136)
7.1 阻尼限制器	(137)
7.2 弹性胶泥限制器	(140)
► 第8章 附录	(141)
8.1 随机振动	(141)
8.2 时域与频域	(144)
8.3 时频变换	(145)
8.4 谱分析	(154)

1

第 1 章

概述



悬挂系统是车辆的车架与车桥或车轮之间的一切传力连接装置的总称，是车辆行驶系统的重要组成部分。悬挂系统包括弹性元件、阻尼元件、导向机构、限制器以及控制系统。

1.1 功用

悬挂系统的主要功能如下：

1. 传递力和力矩

悬挂系统将车身“悬挂”于车桥或车轮之上，导向机构规定了车轮相对于车身的运动，传递纵向力、横向力及各种力矩。导向机构包括用于连接车身与悬挂系统、车桥或车轮与悬挂系统的连杆，履带式装甲车辆常采用平衡肘作为导向机构。

2. 缓和冲击

悬挂系统的弹性元件在车辆行驶过程中起到缓和冲击的作用，由于弹性元件具有弹性，在车轮相对于车身上下运动时，弹性元件发生压缩或伸张（扭转）变形，从而隔离并减轻了车轮通过地面障碍对车身的冲击。

3. 衰减振动

弹性元件压缩时所吸收的能量自身并不能消除，这部分能量会转化为车体的振动，从而影响车辆的各种性能。为了消耗弹性元件所吸收的能量，悬挂系统必须有阻尼元件。阻尼元件可以将振动能量转化为热量而散发掉，从而达到衰减车身振动的作用。

4. 限制车轮的跳动范围

限制器的功用是限制车轮的行程，以避免弹性元件因过度变形而损坏，装有弹性元件的限制器还可在车轮行程末端吸收部分冲击能量，采用液压限制器还能耗散冲击能量。

以上为悬挂系统的主要功能，对于如何判断悬挂系统的好坏，将在下一章作出介绍。

1.2 分类

车辆悬挂系统形式多样，按照不同的分类标准可以分为不同的类型。

1.2.1 按弹性元件分类

悬挂系统按弹性元件分类可分为金属弹簧悬挂系统和液气悬挂系统，金属弹簧悬挂系统的弹性元件为螺旋弹簧或扭杆弹簧；液气悬挂系统的弹性元件为油气弹簧。

金属弹簧悬挂系统中的螺旋弹簧主要用于轮式车辆,其减振元件为液压筒式减振器,扭杆弹簧悬挂系统按照其阻尼元件的不同又可以分为扭杆弹簧+筒式减振器、扭杆弹簧+叶片式减振器和扭杆弹簧+摩擦式减振器。其中,扭杆弹簧+叶片式减振器形式悬挂系统用于我国的主战坦克,而其他履带式装甲车主要采用扭杆弹簧+筒式减振器的形式。

油气悬挂系统按布置形式进行区分:固定缸筒式、摆动缸筒式和肘内式。固定缸筒式的动力缸对于车体固定,缸筒内活塞通过连杆和平衡肘相连;摆动缸筒式动力缸的轴线随车轮跳动而摆动,通常油气弹簧的下连接点直接和平衡肘相连;肘内式油气悬挂的动力缸和平衡肘做成一个整体,可以有效地节省空间,便于总体布置。油气弹簧可以加装阻尼系统,兼作减振器,按照阻尼阀的布置形式可以分为阻尼阀内置和阻尼阀外置。阻尼阀内置结构严整,便于布置,但阻尼阀的发热会导致空气弹簧气体温度显著提高,影响车辆的静平衡位置;外置式便于散热,但管路复杂,不便于总体布置。为了布置方便,可充分利用民用车的零件,也可采用油气弹簧和筒式减振器并联使用的方式。

1.2.2 按参数可调与否分类

悬挂系统按照参数(弹性特性、阻尼特性)可调与否分为不可调的悬挂系统和可调的悬挂系统。

参数不可调的悬挂系统即我们通常所说的被动式悬挂系统。事实上,传统的被动式悬挂并非全是参数不可调的,一些采用空气弹簧悬挂系统的车辆安装有感载阀,能根据悬挂质量的变化,改变空气弹簧的充气压力,以保证车辆的距地高度。上述车辆的悬挂虽然也属于参数可调的悬挂系统,但其参数调整的目的只是改变车高或车姿,并非车辆的振动特性。习惯上,仍然将上述悬挂系统归为被动式悬挂系统。

可调的悬挂系统通常指的是电控悬挂系统,其按照参数控制方式的不同分为主动悬挂系统和半主动悬挂系统。主动悬挂系统和半主动悬挂系统对悬挂系统参数的调节在本质上是不同的。主动悬挂系统在悬挂质量和非悬挂质量之间有一个液压制动器,可以在二者之间施加一个可控的力,来控制悬挂系统的响应特性;半主动悬挂系统只控制悬挂系统的弹性元件和阻尼元件的参数,使悬挂系统的参数始终处于最优状态。因此可以看出,主动悬挂系统和半主动悬挂系统的本质区别在于悬挂质量和非悬挂质量之间是否有外力输入,而并非一些文献中所说的:主动悬挂系统能同时调节悬挂的弹性系数和阻尼系数,半主动悬挂系统只能调节悬挂的阻尼系数。目前绝大多数军用车辆的半主动悬挂系统都只能对悬挂系统的阻尼系数进行调节,而在使用(能够发生弹性变形的)固体材料作为弹性元件的悬挂系统中,无法在不输入外力的情况下实时按需改变悬挂系统的等效弹性系数。而对于空气弹簧和油气弹簧,刚度的调节往往是在主气室之外又串联一个副气室,通过调节主、副气室连通阀的开度来实现:当连通阀关闭时,只有主气室工作,刚度最大,随着连通阀开度增大,悬挂刚度逐渐减小。当连通阀的阻力可以忽略时,相当于主、副气室组成了一个大气室,在此环境中工作时刚度最小。

1.3 军用悬挂系统须满足的要求

军用车辆在行驶过程中,车体振动的剧烈程度随路面不平度、车速和悬挂装置性能的好坏而变化。军用车辆高速行驶时常因悬挂装置性能较差、振动幅值过大而不得不降低车速,

即使装有大功率的发动机,也不能充分发挥发动机的性能,从而降低了军用车辆最大车速的发挥和平均越野行驶速度。试验表明,性能良好的悬挂装置不仅能提高行进间的射击精度和首发命中率,还能提高车辆的耐用性,降低乘员处的振动加速度,提高乘员工作的舒适性,增强乘员持续工作的能力。

对军用车辆的悬挂装置提出如下基本要求:

(1) 尽量小的车体和乘员座椅加速度。这是成员的舒适性指标,当军用车辆以一定的速度沿不平路面行驶时,不应有很大的颠簸和振动,车体和乘员处加速度应较小,从而使乘员能持久工作,并能保证正常的观察及瞄准和射击的准确性。

(2) 较大的悬挂系统动挠度和位能储备。动挠度和位能储备有很大相关性,提高动挠度就是为了提高位能储备,但是,动挠度不能无限提高,它受动行程的限制。对于车辆的悬挂系统,动行程是有限的,当悬挂系统的动挠度超过系统许用动行程时,就会使悬挂系统导向机构杆系撞击限位器,此时称为悬挂击穿。位能储备反映车辆垂直跌落时不发生悬挂击穿的最大高度,即在不发生悬挂击穿时,位能储备越大越好。对于悬挂系统的动挠度,其限制条件为不能超过系统的设计许用动行程。

(3) 较小的车轮动载。该指标的大小主要影响车辆的行驶稳定性(特别是轮式车)和行动系统寿命,该值大,意味着行驶稳定性差(当车轮动载超过车轮的静负荷,且动载荷和静载荷反向时,车轮会离地);过大动载则会导致车轮变形增大,严重影响车轮胶胎或挂胶的寿命。因此,对于车轮的动载,应该是越小越好。

(4) 减振器发热功率不能超过减振器散热极限。减振器的发热功率也是一个限制性指标,当减振器的发热功率超过减振器的最大散热功率时(减振器在最高许用温度下的散热功率),减振器中的橡胶密封件会因过热而被损坏或加速老化。

1.4 悬挂系统的发展

悬挂系统的发展大致经过了三个发展阶段:被动悬挂、主动悬挂和半主动悬挂。

1.4.1 被动悬挂

传统的被动悬挂一般由参数固定的弹簧、减振器及导向机构组成,其中弹簧主要起缓冲和支撑作用,减振器用于衰减振动,导向机构起限位和导向作用。悬挂参数不能随路面的变化和车辆行驶工况的变化进行调节,各部分元件在工作时不消耗外部能源,故称为被动悬挂,其结构如图1-1所示。

被动悬挂结构简单、性能可靠、技术成熟,是当前在军用车辆中应用最为广泛的悬挂形式。理想的悬挂要求在任何情况下,车辆都要有良好的行驶平稳性和操作稳定性,被动悬挂却很难做到这一点,因为车辆在不同的速度和路面上行驶时对悬挂的参数要求不同。为了克服被动悬挂的缺点,人们尝试了多种方法,如采用非线性刚度弹簧协调平顺性和操作稳定性之间的矛盾来改善被动悬挂的性能,

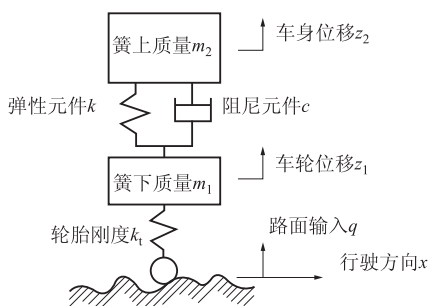


图 1-1 被动悬挂示意

但即使如此,被动悬挂仍无法在任何形式工况下都处于参数最优状态。

1.4.2 主动悬挂

主动悬挂主要有两种形式:一种是利用力作动器(制动器)在悬挂质量和非悬挂质量之间提供外力,代替被动悬挂中的弹簧和减振器;另一种是将被动悬挂和作动器并联,由被动悬挂承担静载,作动器提供增量力,从而降低了主动悬挂的体积和功率消耗。凡是依靠外界能源在悬挂质量和非悬挂质量之间提供力,并能对作用力的大小进行控制的悬挂系统都称为主动悬挂系统。

主动悬挂的概念由通用汽车公司的 Federspiel - Labrosse 教授于 1955 年首次提出。

1.4.2.1 主动悬挂的分类

主动悬挂根据作动器响应带宽的不同,分为全主动悬挂和慢主动悬挂。

(1) 全主动悬挂采用可控的作动器组成一个闭环控制系统,作动器通常是一个具有较宽频率范围的伺服液动油缸,根据控制信号产生相应大小的作用力,其结构如图 1-2 所示。作动器的响应带宽一般至少包括车辆经常遇到的频率范围 $0 \sim 15\text{Hz}$,有的作动器响应带宽可以高达 100Hz ,为了减少能量消耗,一般保留一个与作动器并联的弹簧,用来支持车身的静载荷。

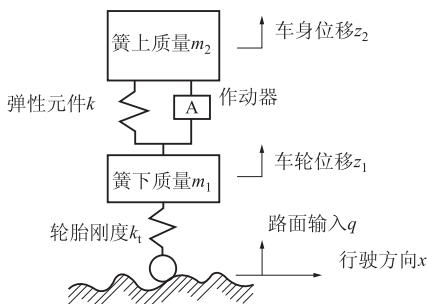


图 1-2 全主动悬挂示意

(2) 慢主动悬挂通常由一个响应速度稍慢的作动器和一个普通弹簧相串联,再与一个被动阻尼器并联构成,其结构如图 1-3 所示。慢主动悬挂仅在一个低频范围(频带宽 $0 \sim 8\text{Hz}$)内进行主动控制。由于慢主动悬挂作动器仅需在一个窄带频率范围内工作,所以降低了系统成本及复杂程度。慢主动悬挂降低了对车轮的振动限制,使系统的能量消耗大幅度降低,在低频路面行驶时其控制性能接近全主动悬挂的控制水平,但当激励超过上限频率以后,其控制效果会恶化,需要采取其他辅助措施。

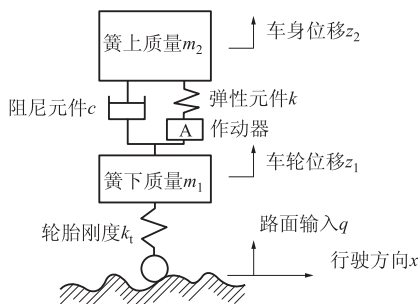


图 1-3 慢主动悬挂示意

1.4.2.2 主动悬挂技术的控制策略

主动悬挂系统控制策略的理论发展历程大体可划分为两个阶段：第一阶段从20世纪60年代初到20世纪90年代初，理论上主要为经典的PID控制和现代的LQR/LQG控制；第二阶段从20世纪90年代初至今，理论上主要为非线性控制、预测控制、神经网络控制、模糊控制、自适应控制、智能控制和鲁棒控制等。

到目前为止，主动悬挂控制研究的第一阶段在理论上已经取得了比较满意的结果，第二阶段的理论正处于研究和探讨之中。车辆悬挂系统属于复杂的非线性参数动力学系统，单一的控制手段难以满足要求，需要两种甚至多种控制策略协同控制。目前，各种不同结构、不同控制算法的主动悬挂系统已经应用到个别军用原型车辆上，其中被广泛使用的有随机线性二次型最优控制（LQG）、模糊控制、PID控制和神经网络控制等。这些控制策略各有优缺点，所以需要将不同控制算法融合，集多种控制算法的优点于一身，使主动悬挂的控制系统能够更加完善，以更好地改善车辆的平顺性和操作稳定性。

模糊控制是最近几十年来新兴起的一种智能控制算法，它模仿人工控制活动中人脑的思维决策方式及其产生的模糊概念和模糊判断，运用模糊数学的理论形成控制策略，把人工控制方法用计算机来实现。模糊控制系统如图1-4所示。

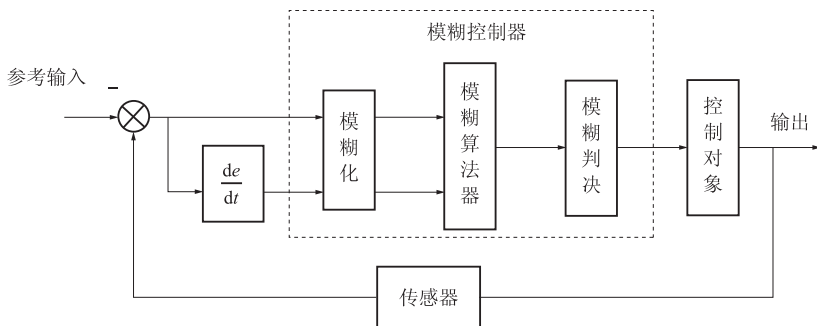


图1-4 模糊控制系统

模糊控制最大的优点就是它不依赖于精确的数学模型，因而对系统参数的变化不敏感，鲁棒性好。常规模糊控制器的缺点是模糊控制规则一旦制定就不能改动，当被控对象的参数或者工况等发生变化时，将无法使控制达到最优。为了更好地改善汽车的综合性能，需要在此基础上进行相应的改进。

自适应模糊PID控制是将PID控制和模糊控制相结合，集二者的优点而形成的一种综合控制策略。自适应模糊PID控制器结构如图1-5所示。

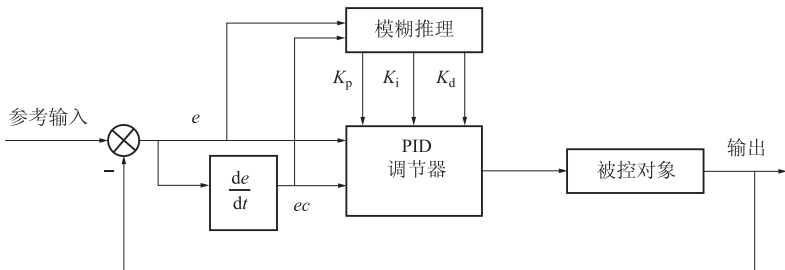


图1-5 自适应模糊PID控制器结构

这些主动悬挂控制方面的理论以及控制器的设计方法,对于车辆主动控制技术的发展,甚至对整个工程领域控制理论的发展和应用,都具有十分重要的意义。

1.4.2.3 主动悬挂技术在军用车辆上的应用实例

1982年,英国 Lotus 公司首次实现了理论到实践的突破。1992年,美军成立了国家汽车中心(NAC),专门研究军用车辆的主动悬挂技术,大大地促进了主动悬挂技术在军用车辆上的应用。目前,以美国 L-3 电子通信公司为首的多家公司正在研制一种电控主动悬挂系统(ECASS),该系统已经在“枪骑兵”20吨级混合电驱动履带式车辆以及“悍马”上进行了多项演示试验。

美国 L-3 公司研制的电控主动悬挂系统(ECASS)用高能带宽度的可控机电作动器(如图 1-6 所示)取代了传统的液压减振器。作动器安装在每个车轮站位置(轮式车辆)或负重轮位置(履带式车辆)(如图 1-7 所示)。

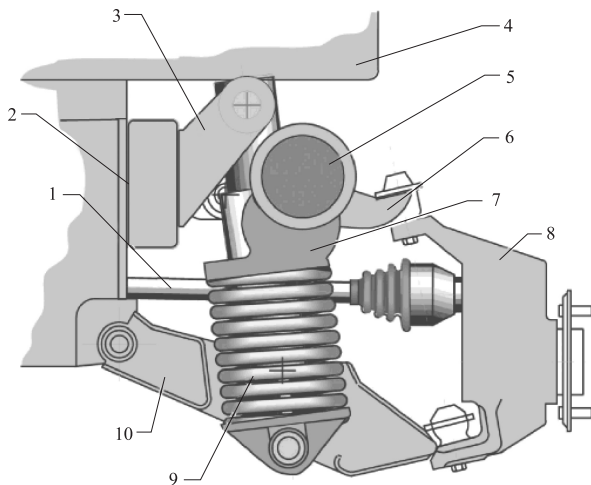


图 1-6 ECASS 作动器结构

- 1—驱动轴; 2—车身; 3—安装支架; 4—车体底板;
5—电动机; 6—上控制臂; 7—EMS 作动器;
8—枢轴; 9—弹簧; 10—下控制臂

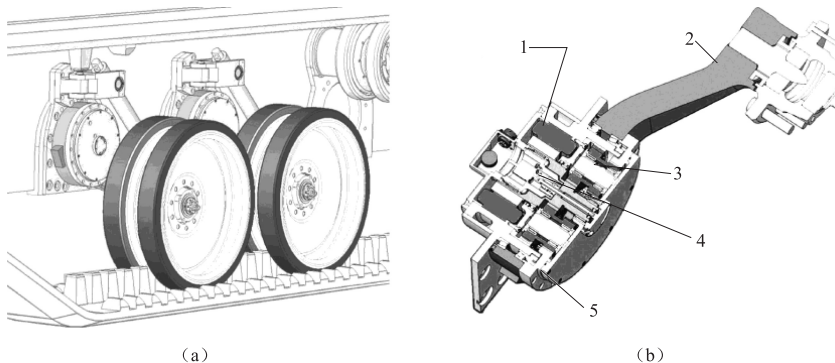


图 1-7 “枪骑兵”车轮站位置及 ECASS 作动器、平衡肘剖面

- 1—电动机; 2—平衡肘; 3—行星齿轮组; 4—传感器组; 5—平衡肘轴承

1.4.3 半主动悬挂

半主动悬挂介于主动悬挂和被动悬挂之间，其可以根据路况和行驶状况的变化，在一定范围内对悬挂弹簧刚度系数或减振器的阻尼系数进行调节。其基本原理是，根据弹簧上质量的加速度响应等反馈信号，按照一定的控制规律调节弹性元件及刚度阻尼元件的阻尼，以使目标函数值最优。其结构如图1-8所示。

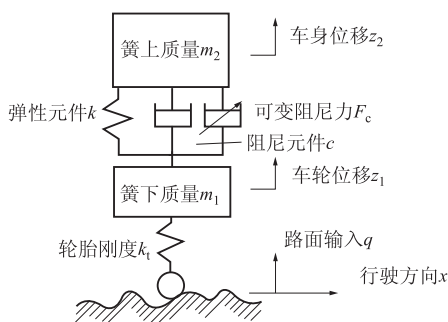


图1-8 半主动悬挂结构示意图

1974年，美国加州大学戴维斯分校 Karnopp 提出半主动悬挂，与主动悬挂相比，半主动悬挂的结构有以下特点：传统的减振器被电控的可控阻尼减振器所取代，系统还保留传统的悬挂弹簧，半主动悬挂没有力发生器，仅通过输入少量控制能量来调节减振器的阻尼，以改善悬挂的振动特性来提高悬挂性能。半主动悬挂控制系统所需要输入的能量与主动悬挂系统所需要输入的能量相比是微不足道的，但半主动悬挂较被动悬挂的性能有显著提高，因此半主动悬挂系统有着巨大的优势，受到了车辆工程界的广泛重视。

1.4.3.1 半主动悬挂的分类

车辆悬挂弹性元件需要承载车身的静载荷，在半主动悬挂中实施刚度控制比阻尼控制困难得多，目前多数半主动悬挂仅进行阻尼调节，即将阻尼可调减振器作为执行机构，通过传感器检测到的汽车行驶状况和道路条件的变化以及车身的加速度数值，由ECU（电子控制单元）根据控制策略发出控制信号，实现对减振器阻尼系数的有级或无级可调。

半主动悬挂分为分级可调半主动悬挂和连续可调半主动悬挂。

分级可调半主动悬挂的阻尼系数只能在几个离散的阻尼值之间进行切换，系统一般具有2~3个预设阻尼值，切换的时间通常为10~20ms。

连续可调半主动悬挂的阻尼系数在一定范围内可以连续调节，阻尼调节一般有以下两种方式：

1) 节流孔等效面积调节

一般通过将步进电动机或比例电磁铁作为动力元件，连续调节阻尼器节流阀的通流面积来改变其阻尼特性。该系统需要复杂的液压结构，对阀的加工精度要求高，整体成本较高。

2) 电/磁流变液黏性调节

另一种实现阻尼调节的方式是使用电流变或磁流变液作为减振液，来实现阻尼无级可调。电流变液在外加电场作用下，黏度、剪切强度会随外部施加的电场强度增大而增大，从而提高减振器的阻尼系数。由于电流变液需要高压（2000V），存在安全性问题，且电流变液在高速剪切下，剪切强度会迅速降低，因此应用较少。磁流变液在母液中悬浮着微小的铁

磁性颗粒（通常为羰基铁粉），在外加磁场作用下，磁性小颗粒会形成链状结构，从而使整个液体的宏观黏度特性增加，且黏度随外加磁场强度的增大而增大；由于磁流变减振器无须高压，汽车用磁流变减振器使用额定车载 12V 电源，电流不超过 2A，响应速度快，可达到毫秒级，是目前应用最广的流变式阻尼可调减振器。

相对于全主动悬挂，半主动悬挂具有耗能小、成本低、控制简单、易于实现以及可靠性较高等优点，从而使得悬挂性能提升明显，故其日益受到人们的重视，成为研究的热点。性能可靠、阻尼可调范围宽的减振器和简单有效的控制策略是半主动悬挂实现产业化的前提。

1.4.3.2 半主动悬挂技术的控制策略

半主动悬挂控制策略主要包括天棚阻尼控制、最优控制、非线性自适应控制和预测控制等。

天棚阻尼控制半主动悬挂是由 Karnopp 教授等提出的一种较为简单且易于实现的控制方式，目前已成为半主动悬挂系统设计中最为普遍采用的一种控制策略。

车辆半主动悬挂系统本质上是双线性系统，很难获得一定意义下的最优控制，并且连续型控制规律要通过解 Riccati 方程才能得到，不利于实时控制。研究较多的最优控制策略有状态反馈最优控制、 H_{∞} 最优控制和统计最优控制。状态反馈最优控制的优点是阻尼力可以反映某些状态参数，达到特定的控制效果；其缺点是需要对涉及的状态参数进行实时监测或在线进行参数估计。 H_{∞} 最优控制可使半主动悬挂系统的振动控制具有较强的鲁棒性，但控制器的设计相对来说较为复杂。统计最优控制不对系统瞬间振动特性做出反应，而是根据一段时间内控制目标的统计值，采用逐步寻优的迭代式控制方法或基于神经网络的自适应控制方法，对阻尼力加以控制。

1.4.3.3 半主动悬挂在军用车辆上的发展

1994 年，Prinkos 等人使用电流变液和磁流变液作为工作介质，研究出了新型半主动悬挂系统。20 世纪 90 年代，军用轮式车辆半主动悬挂系统的研究取得了突破。美国陆军坦克车辆装备司令部在 1997 年前后将由液压可调减振器构成的半主动悬挂系统安装在布莱德利步兵战车上进行了场地试验，结果表明车辆的机动性能得到了大幅度的提高。2003 年前后，美军又在重型“悍马”吉普车上安装了基于磁流变液减振器的半主动悬挂系统，并取得了越野速度提高 30% ~ 40% 的良好试验效果。

从上面的分析不难看出，无论是在公路车辆上，还是在军用车辆上，采用半主动悬挂系统都能极大地改善车辆悬挂系统的性能。我国半主动悬挂系统的研发率先在军用车辆领域展开并取得了重大进展，主要有以下原因：

(1) 对于公路车辆，行驶路况比较简单，目前的被动悬挂系统能够基本满足舒适性和操作稳定性的要求，采用半主动悬挂系统必然会增加成本，而民用车辆又对成本比较敏感。同时，半主动悬挂系统的先期研发需要大量的经费并具有一定风险，一般的企业也不愿意承担这笔费用和 risk。

(2) 对于军用车辆，特别是军用履带车辆，情况则大不相同。履带车辆行驶的路况复杂恶劣，行驶速度和装备质量变化大，各种行驶工况对悬挂系统阻尼的要求也不同，而且变化范围大。当装有被动式悬挂装置的履带车辆在硬的卵石路面以较高速度行驶时，由于目前被动式悬挂系统阻尼比大于该种工况下的最佳阻尼比，因此会过多地将路面振动传给车体，

从而降低减振效果，也易使减振器过热烧毁；而在大起伏路面上低速行驶时，悬挂系统阻尼比又小于该种工况下的最佳阻尼比，无法有效地消除车体的俯仰振动，使乘员乘坐舒适性变差，甚至造成平衡肘频繁撞击限位器，使车辆不得不降速行驶。

因此，如果仍然采用被动悬挂，要全面提高主战坦克行驶的舒适性和极限车速，虽通过提高悬挂系统的许用动行程能减少在起伏地行驶时的悬挂击穿，但解决不了卵石路行驶时的减振器过热问题，何况根据我国现在主战坦克悬挂系统的结构形式，要进一步提高悬挂系统的动行程，发展余地不大。

国内从事军用车辆半主动悬挂的装甲兵工程学院院长进秋教授完成了磁流变式阻尼可调减振器，北京理工大学机械与车辆学院振动和噪声控制研究所从“九五”开始进行军用履带车辆半主动悬挂的研制，目前研制的基于叶片式减振器阻尼连续可调的半主动悬挂已随某型主战坦克定型，图1-9所示为可控式叶片减振器及其原理。

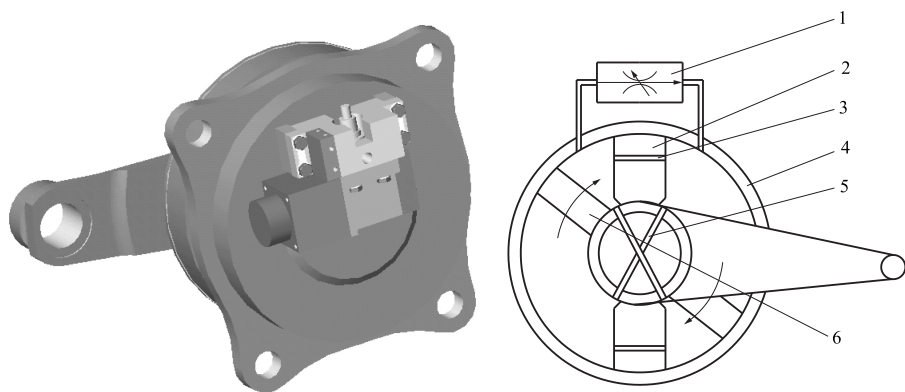


图1-9 可控式叶片减振器及其原理

1—比例阀；2—隔板；3—常通孔；4—壳体；5—均压孔；6—叶片



第 2 章

悬挂系统的性能指标

悬挂系统是军用车辆的重要组成部分，其性能主要为整车战技指标服务。按照我国对于一线军用车辆的要求，其战技指标按照重要性排列分别是：机动性、火力、防护性和可靠性。

悬挂的特性对其他部件的防护性影响不大，但为了满足整车防护性要求，悬挂部件应尽量布置在车轮内侧，以使车轮和裙板能够为悬挂部件提供保护，而不得不布置在车外侧的悬挂部件如液压缓冲器、筒式减振器等，要在满足本身刚度要求的前提下，校核防护性要求，对于不满足要求的部件应进行局部加强。

2.1 悬挂系统对军用车辆火力性能的影响

由于军用车辆的武器系统通常位于车的顶端，属于悬挂质量的一部分，在瞄准射击时，悬挂质量的过大振动会对射击精度特别是行进间射击精度有很大的影响，其中影响最大的是车辆的俯仰振动速度和横摆振动速度造成的火炮方位角的快速改变，所以即使有火炮稳定系统，但上述物理参数仍然会对射击精度造成较大的影响。

火炮射击的命中精度是体现坦克火炮威力的一项重要指标。在现代战争的条件下，要求坦克具有行进间射击的能力。影响射击精度的因素有很多，除了火炮与炮弹的设计性能和制造精度、射击时环境条件和炮手的操纵控制能力之外，行进中坦克发射系统的滞后效应和车体的振动也是非常重要的影响因素。

火炮在射击时，发射系统存在着发射延迟时间。在瞄准目标以后到炮弹出口要经过一段时间，其中包括：炮手瞄准目标直到执行发射的反应延缓时间（约 0.043 s）；发射机构内部动作时间（对于电击发射约为 0.006 s）；点燃火药、气体膨胀和炮弹沿炮管运动的时间（约 0.026 s）。它们的总时间称为发射延迟时间 Δt ，约为 0.075 s（一般在 0.034 ~ 0.160 s）。在延迟时间内，火炮轴线和瞄准线会因车体振动而偏离正确的瞄准射击位置，从而降低射击的命中精度。

2.1.1 悬挂对射击精度的影响

车体的振动会使用机械方式连接的炮塔、火炮和瞄准镜一起振动。对火炮射击精度影响较大的是车体的俯仰振动和横摆振动。俯仰振动将会使火炮轴线在铅垂面内上下摆动，从而引起火炮射击角不断变化，导致弹丸产生很大的落点距离偏差；横摆振动会使火炮轴线在方位方向上产生变化，并引起弹丸的方位偏差。

坦克振动对射击精度的影响如图 2-1 所示。坦克火炮直接瞄准目标后，由于车体行进

过程中的角振动,在发射延迟时间内,炮身轴线相对于瞄准方向会产生偏差角 $\Delta\varphi = \bar{\dot{\varphi}}\Delta t$ ($\bar{\dot{\varphi}}$ 为平均角速度),对于射程为 D 的弹着点高度偏差 Δh 为

$$\Delta h = D \bar{\dot{\varphi}} \Delta t \quad (2-1)$$

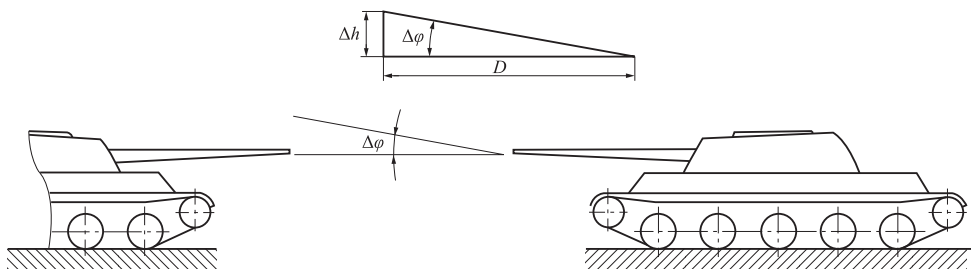


图 2-1 坦克振动对射击精度的影响

由此可知,振动角速度越大,射击偏差越大,欲使弹着点高度偏差 $\Delta h < 1.5\text{m}$,则必须使平均角速度 $\bar{\dot{\varphi}} < 0.01\text{rad/s}$,这就要求悬挂系统在车辆行驶过程中要有效降低车体的振动角速度。由于速度不易测量,故车辆角速度一般采用间接测量法,即角位移微分法和角加速度积分法。角位移微分法即在车辆首尾安装位移传感器,测量振动位移信号,从而推算出振动角位移信号,对角位移信号在时间长度上进行微分,得到角速度信号。角加速度积分法即在车辆首尾安装加速度传感器,测量振动加速度信号,并推算出振动角加速度信号,然后在时间长度上进行积分,得到角速度信号。

行进中的坦克,在距离 D ($D \approx 2\,000\text{m}$) 处,瞄准敌方坦克,设目标高为 H ($H = 2.4\text{m}$),未安装稳定器的坦克炮,在炮手击发到炮弹出膛这段发射延迟时间 Δt 内,火炮随坦克俯仰振动,为使弹丸在弹着点高度上的偏差不超过目标的范围,坦克的振动角速度 $\dot{\varphi}$ 的均方根值 $\sigma_{\dot{\varphi}}$ 应小于 $\frac{1}{3}\left(\frac{H}{2D} \cdot \frac{1}{\Delta t}\right)$,当取 $\Delta t = 0.075\text{ s}$ 时,应有:

$$\sigma_{\dot{\varphi}} \leq \frac{1}{3} \times \frac{2.4}{2 \times 2\,000 \times 0.075} = 2.67 \times 10^{-3} \text{ (rad/s)} = 0.153^\circ/\text{s} \quad (2-2)$$

一般坦克的俯仰角振动速度满足不了这一要求。为提高坦克火炮射击精度,现在坦克火炮都装有火炮稳定系统,使火炮在发射延迟时间内不随车体俯仰,稳定对准目标,因而不必单独提出火炮射击对悬挂的要求。改善悬挂的特性可以改善坦克行驶过程中的振动,也改善了稳定器的工作环境,对稳定器是有益的。

2.1.2 火炮稳定系统

火炮稳定系统是一套对火炮高低射角与方位射角具有驱动和稳定功能的装置。系统在俯仰方向上驱动和稳定的对象是火炮,在水平方向上驱动和稳定的对象是炮塔。利用该系统可以平稳、轻便地控制火炮轴线和瞄准线,因而大大降低了车体振动对火炮射击精度的影响。

在火炮稳定系统中,陀螺仪产生高低和水平方向的稳定及瞄准信号,它是测量火炮振动偏移量的部件。

图 2-2 所示为一种液浮陀螺仪。通电后陀螺电动机高速旋转,密封的浮筒中安装有陀螺框架,在壳体与浮筒之间充满了浮油。只有当经过通电加热的浮油达到某一温度时,才能把浮筒悬浮起来并允许系统进入自动状态。